

## 1 Nanotechnologie

---

»Es gibt noch viel Platz da unten.«

*Richard P. Feynman*

In jeder Sekunde nimmt die Erdbevölkerung netto um fast drei Menschen zu, drei Menschen werden mehr geboren als sterben; jedes Jahr kommen so in nächster Zeit wahrscheinlich weit über achtzig Millionen Menschen zusätzlich zur Welt; und es ist nur noch eine Frage der Zeit, bis die Zehnmilliardengrenze überschritten wird. Um all diese Menschen in Zeiten von Tierseuchen und anderen Katastrophen ernähren zu können und ihnen einen auch weiter steigenden technologischen Standard, verbesserte und billigere Waren bieten zu können, wird eine neue Technologiestufe, die Nanotechnologie, als Technik des 21. Jahrhunderts eine entscheidende Rolle spielen.

Aber was kann man sich unter Nanotechnologie überhaupt vorstellen, welche Möglichkeiten können wir bereits heute nutzen, welche Ideen und Möglichkeiten liegen noch in der Forschung und welche Visionen werden der Welt einen neuen Weg in die Zukunft bereiten?

Viele der großen Visionen der Nanotechnologie werden erst in ferner Zukunft eintreten, vielleicht aber auch so, wie man es sich heute vorstellt, nie realisierbar werden. Eine Reihe von Innovationen wird bereits heute wirtschaftlich genutzt. Schon in den nächsten Jahren werden Mikroelektronik und Biotechnologie immer enger mit der Nanotechnologie verschmelzen und sich durch Entwicklungen in diesen Bereichen auch Fortschritte und innovative Möglichkeiten in vielen anderen Gebieten ergeben.

Obwohl heute manche Konzepte unwirklich erscheinen, wäre es eine Fehleinschätzung, alle Zukunftsvisionen einfach als Utopien abzutun. Die Welt der einzelnen Atome ermöglicht prinzipiell Unglaubliches; Visionen nehmen Gestalt an, die vor wenigen Jahren noch nicht einmal existierten. Und Erfolge der Forschung geben den Visionären der ersten Stunde durchaus Recht, da die Nanotechnologie Platz für neue Ideen bietet, die bisher undenkbar waren. Allerdings ist auch davon auszugehen, dass viele Visionen nie Realität werden. Konzepte

werden an der praktischen Umsetzbarkeit scheitern, da natürliche oder andere Hürden nicht zu überwinden sein werden. Doch das Forschen an diesen von vornherein als nahezu unmöglich wirkenden Visionen kann helfen, die Entwicklung in anderen Bereichen voranzubringen.

Wie bei jeder Technologie gibt es allerdings nicht nur die nützlichen und friedlichen Seiten, auch die Nanotechnologie kann eine »dunkle Seite« entwickeln. Allerdings werden sich die schlimmsten Schreckensvisionen wahrscheinlich ebenso wenig realisieren wie die größten Visionen. Mit übertriebenen Hoffnungen, aber auch mit unbegründeten Ängsten ist der Sache daher sicher nicht gedient. Der erste Schritt einer verantwortungsvollen Auseinandersetzung mit diesem Thema der Zukunft sollte eine umfangreiche Information über die Chancen und Möglichkeiten der Nanotechnologie sein. Nur so kann man die nanotechnologischen Ziele erkennen und ihre Bedeutung für unsere Zukunft verstehen.

## Was ist Nanotechnologie?

Nanotechnologie bedeutet das Vordringen in gigantisch kleine Welten. Allgemein werden künstlich geschaffene Systeme von atomarer Größenordnung bis rund einhundert Nanometer der Nanotechnologie zugeordnet. In der Physik beschreibt die Vorsilbe »nano« den milliardsten Bruchteil einer Einheit; ein Nanometer entspricht also  $10^{-9}$  Metern oder einem millionstel Millimeter. Auf diese Länge lassen sich ungefähr fünf bis zehn einzelne Atome nebeneinander unterbringen. Ein menschliches Haar ist um das Siebzigtausendfache dicker als ein Nanometer. Nanotechnologische Bauteile verhalten sich im Größenvergleich zu einem Fußball so, wie der Fußball zur Erde. Der Begriff Nanotechnologie wurde erstmals 1974 von Norio Taniguchi genannt, durch den er Herstellungsmethoden mit einer über den Mikrometerbereich hinausgehenden Präzision beschreiben wollte.

Das Größenverhältnis zeigt auch die Übersetzung des griechischen Wortes *nanos* ins Deutsche: Zwerg. Und in eben dieser Zwergenwelt werden viele Möglichkeiten unserer Zukunft liegen; bisher als unlösbar geltende Probleme könnten gelöst werden. Es wird sogar für möglich gehalten, dass die Nanotechnologie prinzipiell einen Lösungs-

ansatz für alle naturwissenschaftlichen Fragestellungen unserer Zeit bereithält.

Da die Nanotechnologie jedoch erst am Anfang einer Entwicklung mit teilweise fantastischen Aussichten steht, lassen sich noch keine klaren Grenzen ziehen. Prinzipiell können alle Systeme mit entsprechender Strukturgröße der Nanotechnologie zugeordnet werden, wie beispielsweise heute schon industriell eingesetzte Oberflächenbeschichtungen. Allerdings grenzt der oft als »Nanotech-Papst« bezeichnete Eric Drexler seine Vorstellung von Nanotechnologie weiter ein. Der von ihm eingeführte Begriff »molekulare Nanotechnologie« bezeichnete das gezielte Schaffen von Strukturen durch Kontrollieren und Manipulieren einzelner Atome. Hierbei können durchaus große Produkte entstehen, die allerdings aus nanoskopischen Strukturen durch geplantes Anordnen von Atomen entstanden sind. Auch völlig neue Materialien aus durchaus bekannten Stoffen könnten so geschaffen werden. Die neuen Fähigkeiten entstehen im Gegensatz zu bekannten Funktionen durch die atomare Präzision, die eine bloße Anhäufung klassischer Produktionsverfahren so nie leisten könnte. Bisher besteht diese perfektionierte Nanotechnologie nur in der Theorie.

## Nanotech – eine neue Querschnittstechnologie

Internet- und Biotechboom der vergangenen Jahre brachten neue Entwicklungen hervor. Allerdings waren diese Errungenschaften hauptsächlich nur eine Optimierung der bestehenden Märkte und beschränkten sich technologisch fast ausschließlich auf eine Branche. Das Internet ermöglichte es beispielsweise, Produkte besser und weltweit abzusetzen und durch neue Kommunikationsstrukturen geschäftliche Transaktionen und Informationen schneller zu übermitteln und daraus neue Gewinne zu erzielen.

Die Nanotechnologie beschränkt sich dagegen nicht nur auf einen Bereich; es finden sich überall Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnologie, sei es in der Energie- oder Umwelttechnik, der IT-Branche oder aber dem Gebiet der Biochemie und Gentechnik. Durch dieses interdisziplinäre Wirken der Nanotechnologie eröffnen sich vollkommen neue Perspektiven für einen technologischen Fortschritt, da das

Fachwissen aller Naturwissenschaften gebündelt die theoretischen Möglichkeiten der Nanotechnologie auch praktisch umsetzbar machen wird. Außerdem sind bei Entwicklungen auf atomarer Ebene oftmals die Grenzen zwischen der klassischen Physik, Chemie und Biologie verwischt, da Eingriffe der einen Wissenschaft in ein System unmittelbar die beiden anderen Bereiche beeinflussen. Und nicht zuletzt könnte sich unser Alltag in fernerer Zukunft grundlegend ändern, wenn die Nanotechnologie ihr volles Potenzial entfalten wird.

Die Nanotechnologie als neue Technologiestufe eröffnet weg von bisher bekannten technischen Anwendungen und Produkten völlig neue Konzepte, wobei die Natur die Nanotechnologie schon seit Jahr-millions beherrscht. Durch nanotechnologische Forschung können komplett neue Produkte geschaffen werden, die mit bisherigen Technologien so nicht realisierbar wären, genauso wie man bestehende Materialien optimieren oder mit neuen Eigenschaften versehen könnte. Auch völlig neue Prozessstrukturen zur Güterproduktion sollen durch die Nanotechnologie entwickelt werden.

Obwohl manche Ziele heute noch in unerreichbarer Ferne sind und einige Visionen vielleicht nie Realität werden können, gibt es bereits viele Projekte, die in näherer Zukunft umsetzbar sein werden.

Mit Hilfe der Nanotechnologie verbesserte Brennstoffzellen, Solarzellen oder Batterien ermöglichen das wesentlich effizientere Nutzen regenerativer Energien und könnten damit eine echte Alternative zu den begrenzten fossilen Rohstoffen bieten. Die Umwelt könnte nicht nur durch längere Materialkreisläufe entlastet werden, auch neuartige Stoffeigenschaften zeigen das riesige Potenzial der Nanotechnologie.

Im Bereich der Computerentwicklung wird die Nanotechnologie die Entwicklung von Speichermedien mit deutlich verbesserten Speicherdichten ermöglichen. Die Nanotechnologie eröffnet auch neue Fertigungsmöglichkeiten für bisher übliche Prozessoren. Nanoprozessoren, die mit wenigen oder gar einzelnen Elektronen rechnen und deren Transistoren aus einzelnen Molekülen bestehen können, stehen genauso auf den Arbeitsplänen der Forscher wie daraus resultierende, völlig neue Computersysteme. Der Quantencomputer kann in der makroskopischen Welt völlig unbekannte Effekte ausnutzen, um effektiver und damit deutlich schneller zu arbeiten als bisherige binäre Computer.

Das wohl in der breiten Öffentlichkeit bekannteste Ziel der Nano-

technologie ist zugleich auch eines der großen Fernziele, sollte es so jemals realisiert werden. Unvorstellbar kleine, U-Boot-ähnliche Roboter, sollen in den Körper eindringen und beispielsweise Krebszellen gezielt vernichten. Solche Nanobots könnten in der Medizin der Zukunft mit Sicherheit eine große Rolle bei der Bekämpfung von bisher als unheilbar erachteten Krankheiten spielen. Aber auch durch das Synthetisieren von natürlichen oder künstlichen Stoffen, die gezielt bestimmte schädliche Zelltypen abtöten, wird eine wesentlich effektivere Behandlung von Krankheiten ermöglicht. Und bisherige Medikamente können durch Carriers an ihren Wirkungsort gebracht werden und dort hoch dosiert ihre vollen Fähigkeiten gezielt entfalten.

### Nanomaschinen seit Urzeiten

Als Vorbild dieser neuen Technologie dient teilweise die Natur. Denn in allen organischen Zellen arbeiten schon seit Urzeiten Nanomaschinen. Zellen und ihre Organellen sind nicht nur in der Lage, sich selbst zu reproduzieren, sie synthetisieren auch die Grundstoffe unseres Lebens. Auch sind diese Nanomaschinen in der Lage, alle Vorgänge eines Körpers zu steuern. Ein Mensch kann nur das leisten, was seine Zellen, und damit auch die Zellbestandteile, zusammen leisten können. Dieses Beispiel zeigt auch, dass aus kleinsten Strukturen durch Zusammenwirken im Großen hochkomplexe Strukturen entstehen können. Schließlich ist momentan das menschliche Gehirn der wohl leistungsfähigste existierende »Computer«. Nicht zuletzt besitzt jede einzelne Zelle das wohl effektivste Speichersystem überhaupt, die DNA.

Mit Hilfe der Erbgutstrukturen ist es außerdem theoretisch möglich, über DNA-Bausteine einen für Siliziumcomputer sehr intensiven Rechengang parallel und damit schnell abzuarbeiten. Jede einzelne DNA-Sequenz stellt eine Recheneinheit dar, wodurch sich ein sehr hohes Leistungspotenzial entfaltet. Gerade bei komplexen mathematischen Problemen wie dem »Problem des Handlungsreisenden«, dem Travelling Salesman Problem (TSP), wird eine Lösung dieser mathematischen Aufgabenstellung erst überhaupt effektiv möglich, denn heutige Siliziumrechner wären mit einer solchen Aufgabenstellung über zu lange Zeiträume hinweg beschäftigt. Diese »nasse Seite der Nanotech-

nologie« (Prof. Richard Smalley) hat jedoch den Nachteil, dass sie eben keine elektrischen Ströme erlaubt; jeder Nanobot wäre sofort kurzgeschlossen.

Bis die gigantischen Leistungen der Natur auch für den Menschen kontrolliert in breiteren Anwendungen nutzbar sind, werden noch mehrere Jahrzehnte vergehen. Aber selbst die Anfänge der »trockenen« Nanotechnologie zeigen schon viele bemerkenswerte Möglichkeiten. Die Entwicklung wird mit Sicherheit im Laufe der Zeit auch die schon großen Erfolge der Mikroelektronik in den Schatten stellen. Und diese Erfolge verdeutlicht ein Vergleich, aufgestellt von Microsoftgründer Bill Gates im Jahr 1998 anlässlich der amerikanischen Computermesse Comdex: »Wenn GM eine ebenso schnelle technologische Entwicklung durchgemacht hätte wie die Mikroelektronik, würden wir heute 25-Dollar-Autos fahren, die nur einen Viertelliter Benzin auf einhundert Kilometer verbrauchen würden.«

## Neue Konzepte in kleinsten Dimensionen

Sollte der Eindruck entstehen, die Nanotechnologie wäre nur eine weitere Miniaturisierung der bisherigen Mikrotechnik, wäre das ein falsches Bild. Die Entwicklung des Lasers war auch mehr als nur eine Weiterentwicklung der Glühlampe. Hier wurden völlig neue und vorher unbekannte Eigenschaften von Lichtwellen entdeckt, die die Welt der Naturwissenschaften nicht unerheblich beeinflussten.

Genauso ist die Nanotechnologie auch mehr als nur eine Weiterführung und Verknüpfung bestehender Technologien. Sie unterscheidet sich in mehreren Bereichen deutlich von bisher bestehenden technologischen Möglichkeiten. Mit Hilfe eines Kraftmikroskops ist man heute schon in der Lage, Materialien in atomaren und molekularen Strukturen gezielt zu beeinflussen. So lassen sich Nanobauteile systematisch aus einzelnen Atomen aufbauen; mögliche Produkte dieser Technik wären zum Beispiel Nanotransistoren oder Nanolaser.

In diesen kleinen Dimensionen treten bisher unbekannte Effekte auf, die als die Regeln der Quantenmechanik zusammengefasst werden. Erwähnt sei zu Beginn nur die Fähigkeit von einzelnen Elektronen, sich an mehreren Orten gleichzeitig aufzuhalten, Übergangslos zwischen

zwei Orten zu springen oder durch atomare Wände zu verschwinden: der so genannte Tunneleffekt.

Außerdem können Produkte der Nanotechnologie durch einen weiteren Effekt auf atomarer Ebene, die Selbstorganisation, entstehen. Hierdurch könnten enorme Qualitätssteigerungen ermöglicht werden, da Verunreinigungen von Werkstoffen nahezu auszuschließen sind. Eine optimale Anordnung der einzelnen Bestandteile kann so die makroskopischen Eignungen eines Fabrikats deutlich verbessern.

Die funktionale Komplexität verschiedener Produkte soll durch die Nanotechnologie deutlich verbessert werden; die einzelnen Einheiten einer Maschine werden mit größtmöglicher Präzision zusammenarbeiten und dadurch höhere Leistungen erbringen, die von herkömmlichen Produktionsverfahren so nicht erfüllbar wären. Intelligente Werkstoffe, die sich ihrer Funktion und Umgebung anpassen werden, sind ein mittelfristiges Ziel verschiedener Forschungsprojekte. Aber das theoretische Potenzial der Nanotechnologie wird sich trotz aller aktuellen Fortschritte erst in vielen Jahrzehnten voll entfalten, sollte es in seinen großen Visionen nicht für immer reine Theorie bleiben.

Die ersten spektakuläreren Durchbrüche sind in der IT-Branche und bei medizinischen Anwendungen zu erwarten. Heute beeinflusst die Nanotechnologie hauptsächlich Bereiche der bisherigen klassischen Technologiefelder. Es sind bereits verschiedene Produkte auf dem Markt, die vielleicht gar nicht der Nanotechnologie oder ihrem technologischen Einfluss zugeschrieben werden. Erwähnt seien hier nur Spiegel, die nicht beschlagen, oder mit Nanopartikeln beschichtete, selbstreinigende Glasscheiben.

Die nahe Zukunft wird von der Nanotechnologie ebenfalls mehr oder weniger sichtbar beeinflusst werden. In mehreren Jahren sollen nanotechnologische Entwicklungen Grenzen bisheriger Technologien überwinden. Die Leiterbahnstrukturen von Mikroprozessoren werden in absehbarer Zeit auf den Durchmesser von wenigen zehn Nanometern geschrumpft sein. Mit den bisher verwendeten Strukturierungssystemen ist ein Vorstoßen in diese Dimensionen nicht mehr möglich. Heutige Schaltkreise auf Prozessoren werden mit UV-Licht gefertigt, die so genannte Photolithographie. Natürliche Grenzen werden es dieser Technologie so nicht erlauben, weit unter die einhundert Nanometer Strukturgröße vorzudringen, wobei ein Vorstoßen in diese Dimensio-

nen für die Weiterentwicklung der Computerbranche essentiell werden wird. Kleinere Strukturen erlauben wesentlich schnellere Rechenvorgänge, bedeuten aber auch eine geringere Wärmeentwicklung – was nebenbei für Silizium als Halbleiter auch ein wesentliches Kriterium für höhere Taktfrequenzen ist – und benötigen logischerweise auch weniger Platz. Um weiterhin Kapazitätssteigerungen im bisherigen Maße zu erbringen, werden die bestehenden Fertigungsverfahren auf Optimierungen aus der Nanotechnologie zurückgreifen, um die nötige Präzision liefern zu können.

All diese Beispiele zeigen, dass die Nanotechnologie in der Zukunft eine wichtige Rolle spielen wird. Daraus wird die Chance entstehen, an einer umfassenden technischen Revolution teilzuhaben, denn was die Nanotechnologie schon durch kleine Entdeckungen hervorbringen wird, kann der Grundstein vieler Anwendungen von morgen werden. Auf Grund der weiten technologischen Basis wird davon ausgegangen, dass die Nanotechnologie im Gegensatz zu dem Internetboom der Vergangenheit zu keinem kurzfristigen Trend wird. Manche Experten sprechen schon von der letzten industriellen Revolution der Menschheit.